第40卷 第6期
2023年12月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 6
Dec. 2023

文章编号:1000-4939(2023)06-1239-10

结构安全观念的进化直至破损-安全的结构拓扑优化

隋允康[1],彭细荣[2]

(1. 北京工业大学工程数值模拟中心,100124 北京;2. 湖南城市学院土木工程学院,413000 益阳)

摘 要:确保结构安全是力学在工程应用中永远关心的问题,为此,综述了结构安全观念的进化过程,将其划分为5个阶段:其一、从材料的永驻安全到材料的常驻安全,这是观念的滥觞;其二,从材料的尽驻安全到构件的尽驻安全,这是观念的渐变;其三,从构件的尽驻安全到结构的破损-安全,这是观念的飞跃;其四,基于破损-安全的结构截面与形状优化,这是观念的叠加;其五,基于破损-安全的结构拓扑优化,这是观念的昇华。由于第五阶段是学者们在当前最关注的研究之一,对此着墨颇多,且举出了有代表性的理论和算例。接着,又在观念的启迪和观念本质上,进行了两方面的展开:其一,从基于破损-安全的结构分析和结构优化,讨论了观念的启迪,启迪1是,遵循破损-安全设计原则而不放弃安全-经济设计原则,启迪2是,沿袭超静定结构的感性设计经验上升到理性生成冗余区域的阶段;其二,从结构在役破损-安全的时间与空间剖析,讨论了观念的本质,并且给出了清晰的列表。

关键词:结构分析和优化;结构安全观念;发展历程;基于破损-安全的结构拓扑优化

中图分类号:O343.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.06.002

Evolution of the concept of structural safety to the fail-safe topology optimization

SUI Yunkang[1],PENG Xirong[2]

(1. Numerical Simulation Center for Engineering,Beijing University of Technology,100124 Beijing,China;
2. Department of Civil Engineering,Hunan City University,413000 Yiyang,China)

Abstract:To ensure structural safety is the fundamental problem of mechanics in the engineering application. Therefore,the evolution of the concept of structural safety is summarized this paper,which is divided into five stages. First,from permanent safety of materials to long-term safety of materials,which is the origin of the concept. Second,from the utmost safety of materials to the utmost safety of components,which is the gradual change of the concept. Thirdly,from the utmost safety of the component to the fail-safe of the structure,which is a leap of the concept. Fourth,structural cross-section and shape optimization

收稿日期:2021-10-20 **修回日期**:2022-04-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11672103);湖南省教育厅重点项目(No. 21A0507);湖南省自然科学基金资助项目(No. 2022JJ30113;2021JJ50145);湖南省教育厅科学研究项目青年项目(No. 19B106)

通信作者:彭细荣,教授。E-mail:pxr568@163.com

引用格式:隋允康,彭细荣. 结构安全观念的进化直至破损-安全的结构拓扑优化[J]. 应用力学学报,2023,40(6):1239-1248.
SUI Yunkang,PENG Xirong. Evolution of the concept of structural safety to the fail-safe topology optimization[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(6):1239-1248.

based on fail-safe, which is the assemble of the concept. Fifth, the structural topology optimization based on fail-safe is the sublimation of the concept. As the fifth stage is one of the most concerned researches by scholars at present, more literature materials on it are listed and representative theories and examples are presented in this paper. Then, in the enlightenment and essence of the concept, developments are carried out: First, from the view of the structural analysis and optimization based on fail-safe, the enlightenment of the concept is discussed. Enlightenment 1 is to follow the fail-safe design principle without abandoning the safe-economic design principle. Enlightenment 2 is to follow the experience-based design of statically indeterminate structure to the design stage of the rational generation of structural redundancy. Secondly, from the time and space analysis of structure on-service fail-safe, the essence of the concept is discussed and a clear list is given.

Key words: structural analysis and optimization; structural safety concept; development history; fail-safe topology optimization of structure

结构如同其他的人造物品一样,都是为了满足人类需求而承载某种功能,不同之处在于:结构除了要实现功能需要,还要满足安全保障的要求。甚至可以说,安全比功能更加性命攸关,在某种意义上,它成了极为关键的问题。

人们对于安全保障的认识和实施,经历了时间漫长的探索,交织着沉重的流血代价和昂贵的理性思考。因为结构是由构件组成的,而构件是由材料制造的,所以早期对于结构安全的理解,十分自然地停留在对于材料和构件的关注上。

1 观念滥觞——从材料的永驻安全到材料的常驻安全

回顾结构安全理念的进化,为的是思索出一些有益的结论。首先需要从材料、构件到结构 3 个层次去把握,另外还需要注意,3 个层次实际上是结构的空间由小到大的展开,相应地,结构还有一个时间的持续,保证了结构的在役工作。在役结构的空间与时间综合提出了设计者对于结构安全的期许。

在人类最早期阶段,虽然不存在结构安全的科学与技术,但是却有对于结构安全的期许,这就是从结构到构件,乃至到材料:“尽驻安全”+“永驻安全”。“尽”是指结构上所有之处,直到组成结构的每一构件,乃至组成构件的所有材料。“永”是指永远之意。这是第一阶段的安全理念。

正如贾宝玉的通灵宝玉上曰:“莫失莫忘,仙寿恒昌”,亦如薛宝钗金锁上的字:“不离不弃,芳龄永继”,有趣的是,“仙寿”和“芳龄”的永恒皆可譬如“永驻安全”,工程师设计时“莫失莫忘”,在役结构的各点“不可离弃”这一理念。

“仙寿”和“芳龄”只是愿望,接着对于结构的安全期许则是:组成结构的构件,其材料:“尽驻安全”+“常驻安全”,人们从疲劳寿命入手把握了“安全寿命”的概念,从而,企望“永驻安全”的幻想让位于在材料的寿命期间中,构件是安全的,称为“常驻安全”。虽然“永”退为“常”,却是十分重大的进步。这是第二阶段的安全理念。

应当说,材料力学揭示材料寿命的概念,建立了巨大的功绩。由此,工程设计形成并采用了安全-寿命设计(safe life design)的原则。特别需要指出的是,极其敏感从而系念于安全的飞机结构设计,对于安全理念进化做出了卓著的贡献。

2 观念渐变——从材料的尽驻安全到构件的尽驻安全

航空领域出现了损伤容限设计(damage tolerance design)规范,本质上,这对于材料或构件能否实现结构安全,有了回归于实际的思考。意识到结构材料内部都有来自所选材料固有的、加工和使用过程中产生的缺陷,从理想无瑕疵材料向现实有缺欠材料的回转。

按照损伤容限设计规范进行设计[1],标志着人们又一次修正和完善了安全设计的理念,本质上,容忍材料的局部损伤,放弃了材料的“尽驻安全”,换取为构件的“尽驻安全”。空间上是构件的“尽驻安全”,时间上依然是“常驻安全”。这是第三阶段的安全理念,即组成结构的构件:“尽驻安全”+“常驻安全”。

虽然第三阶段安全理念与第二阶段的安全理念很相似,但是不同,它的对象是组成结构的构件。也就是,从材料层次上升到了构件层次。

上述安全理论与实践的进化,尽管用于整体结构的设计,并且取得了难能可贵的成效,但是依然是把材料、构件尺度上安全理论应用于结构尺度上。

这个安全的理念,也具有时间和空间两个方面的内涵:一是保证不少于寿命时限的安全,二是保证组成结构的每个构件都安全。这是持续了很长时间的观念:所有构件尽处于常驻安全状态,结构也就常驻安全了。

3　观念飞跃——从构件的尽驻安全到结构的破损-安全

尽管构件的“尽驻安全” +“常驻安全”的理念十分合理,人们还是在探索:是否存在另外的合理观念? 人们终于领悟和提炼出“破损-安全”的观念。为了理解这个观念,有必要把这个观念与常驻安全的观念联系起来,在比较当中进行思考。

从安全-寿命设计原则发展出来的损伤容限设计规范,可以有两种解读:一是从材料尺度上看,它容许材料中存在局部损伤状态;二是从构件尺度上看,所有构件都处于常驻安全的状态,从而实现了构件的尽驻安全。也就是说,容忍部分材料的局部损伤换取了所有构件的常驻安全。

换句话说,尽管构件尽驻安全即每个构件都安全,但是不保证构件上每处材料都安全;单纯的“安全”观念派生出了“破损-安全”的观念。这就是一个构件处于安全的背后的本质:容忍部分材料的破损。

如果进行一个简单的逻辑推演,把这个材料和构件的关系延伸到构件和结构的关系上,那么,就可以提出如下命题:是否能容忍一些构件的损伤以换取结构的安全? 或者说:是否能容忍局部的损伤以换取结构整体的安全?

这就是结构尺度上的破损-安全观念,是实现结构系统安全的做法。强调站在结构尺度上遵循破损-安全理念,不再坚持每个构件都确保常驻安全的以往理念。

梳理一下,传统的“安全”观念用在结构上,经历了 3 个阶段的理念。

第一阶段的安全理念:材料的“尽驻安全” +“永驻安全”。

第二阶段的安全理念:材料的“尽驻安全” +“常驻安全”。

第三阶段的安全理念:构件的“尽驻安全” +“常驻安全”。

“破损-安全”观念用在结构上,目前经历了两个阶段的理念。

第三阶段的安全理念(见上),意味着:容许部分材料的损伤,构件处于常驻安全。

第四阶段的安全理念:容许存在局部结构的损伤,换取了结构整体的常驻安全。

不难看出,第三阶段的安全理念虽然属于传统的“安全”观念,其实也可以看成“破损-安全”观念的开始。而且,由于构件的尽驻安全,也就实现了结构整体的常驻安全。

虽然在上述的叙事中,它是一个逻辑推理的结论,实际上,它更是空难事故之后人们反省的沉重结果。

1954 年,两架德哈维兰-彗星(De Havilland Comet)喷气式客机因机身爆炸而坠毁,于是,起源于上世纪五十年代结构尺度上“破损-安全”的设计原则被提出来[2]。

结构尺度之破损-安全设计理念的要点是:不是要求结构“固若金汤”,而是容许结构在役中发生局部结构的破坏,但是务必能够“带伤工作”,亦即要求结构带伤即破损后仍然确保安全。NIU[3]给出的破损-安全设计定义是:结构出现一定程度的局部破损后仍需支撑 80% ~100% 的使用极限载荷而不发生灾难性的破坏。如下正反两个例子,印证了破损-安全设计原则是当今结构不容忽视的高安全理念:2010 年 11 月 4 日,机型为空中客车 A380-842 的澳洲航空 32 号航班,虽然在印尼巴淡岛上空发生引擎爆炸事故,但是最终成功返航降落新加坡樟宜机场,无人伤亡。严格讲,引擎不属于结构部件,它与结构等组成了飞机系统,此事故可以引出系统级的破损-安全设计原则,自然能够退回到结构,得到结构级的破损-安全设计原则。911 事件中两架民航客机撞毁纽约世贸大厦的严重灾难,惊醒了建筑物和构筑物的结构设计工程师,使他们意识到遵循结构系统级或结构尺度上破损-安全设计原则的必要性,致使结构尺度的破损-安全设计成为研究的一个热点[4]。

材料、构件和结构依次为结构系统的由小至大的 3 个尺度,人们对于结构安全的设计,经历了“以小表大”到“以大容小”的过程,因此,当今已经到达

结构系统安全的阶段了,可见在结构尺度上研究破损-安全设计原则,是十分必要的。

4 观念叠加——基于破损-安全的结构截面与形状优化阶段

1960 年 SCHMIT[5] 首先给出了用数学规划方法求解多种载荷情况下弹性结构设计的数学表达,开启了结构优化技术新时代。

将破损-安全设计观念同结构优化设计观念叠加,即考虑破损-安全的结构优化技术,最早可以追溯到上世纪 70、80 年代 SUN 等[6] 及 ARORA 等[7-8] 针对截面层次的结构优化。AROEA 等[7-8] 通过预先指定结构破损状况,将结构破损-安全优化问题归结为考虑各种结构破损状况下性能约束的传统结构优化问题。FENG 等[9-10] 以结构截面优化为例讨论了结构冗余与结构构型间的关系。MARHADI 等[11-12] 研究了结构局部破损对桁架结构最优设计结果的影响。杜剑明等[13] 提出桁架结构破损-安全优化的双层规划法,上层规划寻求杆件的最优尺寸,下层优化确定结构最不利破损状况,避免了人为设定破损状况的不足。

在考虑破损-安全的结构优化中,由于对每个结构局部破损状况均需要进行结构分析和敏度分析,即使对桁架这样的简单结构进行截面层次的优化,其计算量也很大。因此,如何模拟结构的局部破损及减少计算量成为破损-安全结构优化的关键。

5 观念升华——基于破损-安全的结构拓扑优化阶段

自 1904 年 MICHELL[14] 研究框架结构(frame structures)拓扑优化问题以来,结构拓扑优化研究处于由桁架和刚架构成的骨架结构阶段[15],直到 1988 年 BENDSØE 等[16] 开创了连续体拓扑优化阶段,该文提出了均匀化方法,以致激发后续发展了很多方法,诸如变密度方法[17]、ICM(独立连续映射)方法[18]、ESO(进化结构优化)方法[19]、水平集方法[20]、相场法[21]、拓扑导数法[22]、MMC(移动可变组件法)方法[23] 等。新概念的提出,带给力学家和工程师的惊讶之处在于:连续体的最优构型通常类似于一个离散结构,而且,工程师提出的桁架和刚架的巧妙构型往往都能从连续体拓扑优化的结果找到印证。

对结构拓扑优化进行破损-安全设计原则的研究,起始于 2014 年 JANSEN 等[24] 对连续体结构进行的体积约束下极小化结构柔顺度问题的研究。JANSEN 等首次将破损-安全的考虑引入到连续体结构拓扑优化问题中,提出了在设计空间内布置一定大小及形状的破损区域来模拟结构局部破损。

然而,JANSEN 等的研究存在两处不足:JANSEN 等在每个单元的中心布置一个结构局部破损区域,导致结构破损状况数与结构的单元数几乎相同,从而产生非常大的计算量;JANSEN 等提出了模拟连续体结构局部破损的办法,但没有探讨离散元件破损测试应满足的条件,即没有探讨结构局部破损模式应如何排列才能实现使拓扑优化生成的离散元件至少出现过一次破损。

ZHOU 等[25] 研究了局部破损区域布置形式及数目对最优拓扑的影响,通过几何分析,讨论了局部破损区域布置的两类层级模式,认为在通常情况下,将破损模式以无缝平铺的排列方式所生成的结构局部破损状况集合,可以得到足够多冗余的最优拓扑,因而结构局部破损状况数大幅降低,极大提高了求解效率。周明等对破损区域布置问题的探讨,降低了结构破损状况数,使得计算量能够被接受,这是周明等做出的重大贡献。周明等尽管给出了局部破损区域布置方案及相关结论,却并未形成可应用的局部破损区域预估分析的理性准则。彭细荣和隋允康在破损-安全观念下建立了位移约束下结构最轻化模型并求解,提出了对局部破损区域合理布置的准则,从而保证了在完全切断构件的情况下尽量少排布破损区域,进而探讨了破损区域的参数对结构最优拓扑的影响[26-29]。WANG 等[30] 基于 SIMP 法求解了体积约束下最小柔顺度问题,引入 Mises 应力判别准则,以减少优化模型中不起控制作用的破损状况。

基于一定规则布置破损区域的方法每次迭代需要计算过多的破损状况,然而仍有可能被遗漏。AMBROZKIEWICZ 等[31] 提出了一种破损-安全拓扑优化的方法,在优化过程中,结构构件被识别为“构件”和“结点”,在此识别基础上,在优化过程中自适应地调整破损区域的大小、形状和位置,以覆盖结构的所有承重部分,以尽可能减少破损区域的数量。与 JANSEN 等的方法相比,每次迭代中需要考虑的破损区域的数量减少了一个数量级。然而,由于优

化问题不断变化,优化并不能在所有情况下都可靠地收敛。进而 AMBROZKIEWICZ 等[32]又提出了一种两步优化方法:第一步求解不考虑破损-安全的体积约束下最小柔顺度的优化模型,得到最优拓扑,然后识别此最优拓扑的结构构件;第二步进行考虑破损-安全的形状优化,优化过程中只考虑先前识别的结构构件的破损,通过将第二步优化步骤限制在形状优化上,其优化过程得到可靠地收敛。KRANZ 等[33]提出了一种基于传力路径布置破损区域位置及大小的方法。算例表明在基于应力的破损-安全拓扑优化中,只使用少数局部破损就足以产生性能良好的破损-安全设计,显著降低了计算成本。

前述研究中,破损区域在优化过程中均是固定的,对"构件"进行切断是通过合理地布置破损区域位置来实现的。HEDERBERG 等[34]基于可移动组件法求解了体积约束下最小柔顺度的破损-安全拓扑优化问题,其破损区域用可移动的空洞表示,比固定的破损区域模式更为合理。SMITH 等[35]基于结构拓扑优化的几何投影法,求解体积约束下最小柔顺度的破损-安全拓扑优化,每次移动一个几何组件模拟破损。由于所需的分析数量与几何组件的数量成正比,并且独立于网格,因此所提出的方法比基于密度的拓扑优化技术更有效。

上述破损-安全拓扑优化研究中,均没有考虑破损的发生概率,破损区域的大小也没有考虑其随机性。MARTÍNEZ-FRUTOS 等[36-37]用水平集拓扑优化方法,考虑随机破损状况,求解了体积约束下最小化结构柔顺度问题,提出了一种基于风险规避措施的连续体结构破损-安全拓扑优化的概率方法,该方法同时考虑了发生破损状态的可能性和破损区域大小的随机性,与考虑确定性发生的完全破损情况的方法相比,概率框架允许设计者假设一定水平的风险,避免了由于低概率损伤而导致的结构性能的不必要增加。

离散结构的破损-安全拓扑优化的研究相对较少。在考虑破损-安全的桁架结构拓扑优化设计中,可以通过一次移去一个杆件的方式模拟杆件的破损[38]。但如果考虑一次破损涉及两个或两个以上构件的破损,则会导致破损状况的组合爆炸问题,产生计算量上无法接受的破损状况数。目前离散结构的破损-安全拓扑优化中,破损均是采取一个破损状况下仅设定一个构件破损。STOLPE[39]对桁架结构进行破损-安全拓扑优化设计,求解体积约束下最小结构柔顺度(即最大结构刚度)问题,结果表明破损-安全拓扑优化最优拓扑结构具有更多的冗余。

上述各研究均显著减少了破损状况数,使得破损-安全拓扑优化在计算量上降至了可接受的范围。尽管如此,计算量大仍是破损-安全拓扑优化的显著特点及难点所在。可以看到,在结构拓扑优化中考虑破损-安全的设计原则,由于拓扑优化设计变量数目巨大、本质属于一个大规模的离散优化问题、以及结构拓扑构型本身有待优化确定等,使得在截面层次的两个困难,到了拓扑优化层次,显得尤为困难。

1)如何模拟结构局部破损?

连续体结构拓扑优化尽管可以得到类似离散形式的拓扑,但其"离散元件"的形成是在优化过程中逐渐出现的,无法预先知道其准确的位置[24-25],因而不容易做到准确地移去一个"构件"。这就成了考虑破损-安全问题研究的瓶颈。

2)如何减少计算量,提高求解效率?

在考虑破损-安全的结构拓扑优化中,需要考虑每一结构破损状况下结构的性能,使之最优或满足约束条件,因而需在每个求解的迭代步内对每一结构破损状况进行结构分析和敏度分析,而结构破损状况数目通常很大,加上拓扑优化本身设计变量数又通常很大,致使考虑破损-安全的拓扑优化的计算量非常大,需要提出减少计算量、提高效率的建模及求解算法,才可以使求解工程实际问题的时间保持在人们可接受的范围内。

前述诸研究对上述两个问题均提出了一些解决方案,但均没有很好地解决,考虑破损-安全的结构拓扑优化理论框架还远未成形,在高效的建模及求解算法方面有很大的提升空间。

需要指出的是,上述各研究,除彭细荣及隋允康[26-29]的优化模型是以结构性能作为约束极小化结构体积外,其他研究均是结构体积约束下柔顺度极小化问题。

对体积约束下柔顺度极小的拓扑优化问题,如 JANSEN[24]及 ZHOU[25]等基于 SIMP 法建立的优化模型为

$$\begin{cases}\text{Find } \boldsymbol{x}\in E^N \\ \text{Make } \max\limits_{s=1,\cdots,S} C_s(\boldsymbol{x})\rightarrow\min \\ \text{s. t. } V(\boldsymbol{x})\leqslant\overline{V} \\ 0\leqslant x_i\leqslant 1\ \ (i=1,\cdots,N)\end{cases} \tag{1}$$

其中:$\boldsymbol{x}$ 为单元密度设计变量;$C_s(\boldsymbol{x})$ 为第 s 号结构破损状况所对应的结构总柔顺度;V 及 $\overline{V}$ 为结构总体积及总体积约束值。

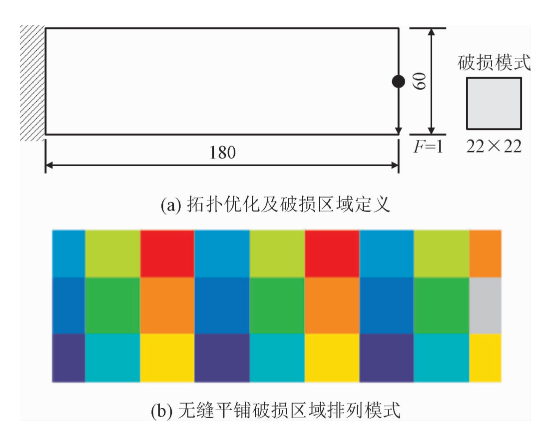
彭细荣及隋允康[26-29]基于 ICM 方法,建立结构位移约束下体积极小化的优化模型为

$$\begin{cases}\text{Find } \boldsymbol{t} \in E^N \\ \text{Make } V(\boldsymbol{t},\boldsymbol{\Phi}) = \max\limits_{s=1,\cdots,S} V_s(\boldsymbol{t}) \to \min \\ \text{s. t.} \quad u_{jls}(\boldsymbol{t}) \leqslant \overline{u_j} \\ \quad (j=1,\cdots,j;l=1,\cdots,L;s=1,\cdots,S) \\ \quad \underline{t_i} \leqslant t_i \leqslant 1 \,(i=1,\cdots,N)\end{cases} \tag{2}$$

其中:$\boldsymbol{t}$ 为拓扑设计变量向量;$V(\boldsymbol{t},\boldsymbol{\Phi})$ 为结构破损状况集合 $\boldsymbol{\Phi}$ 中所有结构破损状况对应的结构体积最大值;$u_{jls}(\boldsymbol{t})$ 为结构破损状况集合 $\boldsymbol{\Phi}$ 中第 s 号结构失效状况对应的基结构 Ω_s 在第 l 号载荷工况下的第 j 号位移约束函数;$\overline{u_j}$为第 j 号位移约束值;J 为位移约束总数;L 为载荷工况总数;$\underline{t_i}$ 为防止有限元分析时总刚度矩阵奇异而设置的拓扑变量下限值,通常可取$\underline{t_i}=0.01$。

下面算例显示了两种模型之间的差别。

如图 1(a)所示,基结构尺寸为 180×60,厚度为 1,采用 22×22 的正方形作为结构局部破损模式,如图 1(a)中灰色正方形所示,采用 ZHOU 等[25]研究中的结构破损状况分布如图 1(b)所示。材料弹性模量 $E=1.0$,泊松比 0.3,左边固定,右边中间点作用竖直向下集中力 $P=1.0$。采用 180×60 网格进行计算。ZHOU 等求解结构体积比为 40% 约束下,极小化结构柔顺度问题。彭细荣及隋允康[26-29]求解位移约束集中力作用方向的位移小于 570,极小化结构总体积问题。



(a) 拓扑优化及破损区域定义

(b) 无缝平铺破损区域排列模式

图 1 破损-安全拓扑优化问题定义

Fig. 1 Define of the fail-safe topology optimization problem

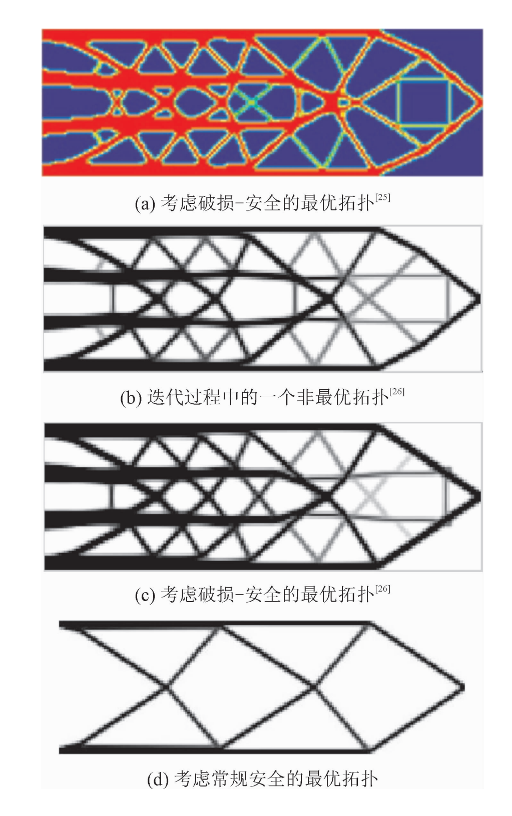
ZHOU 等[25]得到最优拓扑如图 2(a)所示,彭细荣及隋允康[26]得到的最优拓扑如图 2(c)所示,最优体积比为 39.46%。不考虑破损-安全的传统拓扑优化得到的最优拓扑如图 2(d)所示。算例比较可以得出。

1)考虑破损-安全的拓扑优化得到的结果更复杂,具有更高的冗余度(图 2a 及 c 与 d 比较)。

2)不同的优化模型在几乎相同的体积比下,最优拓扑形式是类似的,但不完全相同(图 2a 与 c 比较)。

3)基于 ICM 方法的以结构体积极小化的拓扑优化方法具有更好的寻优能力,图 2(b)只是 ICM 方法优化过程的一个中间结果,其与 ZHOU 等结果(图 2a)类似,尖端为曲线形,但与最优拓扑(图 2c)略有不同,其尖端为直线形。

4)ICM 方法类比于荷载工况,将在不同结构破损状况下的位移在优化模型中以约束的形式考虑,使所有结构破损状况的性能均得到满足(式 2);而在极小化结构柔顺度的模型中,其目标为 Minimax 问题(式 1),JANSEN 等[24]采用 K-S 函数进行凝聚转化为单目标优化问题求解,ZHOU 等[25]采取将原目标函数转化为柔顺度的上限约束,然后使上限极小化予以求解。LÜDEKER 等[40]指出在破损-安全优化的严格优化模型中,破损-安全要求应被视为约束,才能提供真实有效的破损-安全设计。


(a) 考虑破损-安全的最优拓扑[25]

(b) 迭代过程中的一个非最优拓扑[26]

(c) 考虑破损-安全的最优拓扑[26]

(d) 考虑常规安全的最优拓扑

图 2 最优拓扑

Fig. 2 Optimized topologies

6　观念启迪——基于破损-安全的结构分析和结构优化

6.1　启迪 1——遵循破损-安全设计原则而不放弃安全-经济设计原则

结构轻量化设计是航空、航天、交通运输等领域内节能减排的最有效措施之一[41]，是这些运载工具技术发展的重要战略目标[42]。轻量化设计的主要途径有结构轻量化、材料轻量化和制造工艺先进等。结构轻量化是通过结构截面、形状及拓扑优化等技术，实现结构轻量化创新设计。

在结构轻量化的研究中，“连续体结构拓扑优化”居于最令人关注的位置：从纵向看，位于材料、截面、形状、拓扑层次的顶端，建模与求解的难度最大，却能够取得更大的经济效益，在结构设计中已得到广泛关注；从横向看，通常能得到骨架形式的结构构型，不仅同骨架结构拓扑优化沟通，而且往往能超越结构设计工程师的经验和想象，导致发挥别开生面的结构拓扑创新能力。

尽管我们以往做了大量的连续体结构拓扑优化研究，但是遵循的是常驻安全的理念，这几乎是一种不假思索的习惯。

令人深思的是，重视结构轻量化的飞机设计师与忽视结构优化设计的土木设计师竟然会在破损-安全上取得了一致的看法，都认可该设计原则是值得遵循的指导思想。

谈到轻量化，实际上涉及到结构的经济指标。结构作为人造物品，制造需要成本，使用则需要安全，因此，归结为安全-经济的设计原则，飞机的上天功能决定了要履行该原则。其实，建筑物和构筑物建造也是需要花费成本的，土木结构的经济当然也是该领域工程师关注的指标。

破损-安全设计原则同传统设计的安全-经济设计原则是一个怎样关系？如何协调二者的关系？同时考虑两个设计原则会不会使我们受益？

材料力学作第一门为变形体力学，首次揭示出构件或结构在安全与经济上的矛盾。在满足预订功能的前提下，一个好的设计是安全与经济的恰当平衡。

安全同力学性能息息相关，因而在材料力学中是一个显性指标。经济属于投资能力，潜藏在材料选取中，在材料力学中是一个隐性指标。只有到了构件或结构的优化设计，经济也才变成了显性指标。

破损-安全设计原则与安全-经济设计原则相比，破损-安全的整体其实是安全-经济设计原则中对于安全指标认识的深化，可见破损-安全设计原则是安全-经济设计原则的子原则。类似地，安全-寿命设计原则和损伤容限设计规范也都分别是安全-经济设计原则的子原则和子规范。不难理解，安全-经济原则是设计的永恒总主题。

有了对于前面第一个问题的这个回答，第二个问题就不难回答了，应当抓住常常居于隐性指标的经济，抓住结构“轻量化”体现经济指标最小化。至此，第三个问题也可以迎刃而解了，原因是，基于破损-安全的考虑，跳出了常驻安全理念的窠臼，更加与实际情况接轨，通过容忍一些构件的局部损伤换取结构常驻安全的结果。也就是说，同时考虑两个设计原则，会使我们受益匪浅。

6.2　启迪 2——沿袭超静定结构的感性设计经验上升到理性生成冗余区域的阶段

将连续体结构拓扑优化与结构系统的破损-安全理念相结合，意味着容许结构的一部分含若干构件或某些子域发生破损，即：此时虽然结构的某些局部不能工作，但是整体却要承担安全使命，而且尚不放弃结构的拓扑优化设计，这就带来了一系列从未曾遇到的困难：其一，确定破损区域大小和位置的困难；其二，如何在某个局部破损求出最优拓扑结构的困难；其三，协调众多局部破损下最优拓扑构型的困难；等等。

上面列举的诸多困难处于不同的层次，这里就只考虑一个最根本的问题：在局部破损时，要求结构还要工作，能够做得到吗？这个要求属于可行性研究的范畴。

似乎实现此要求有很大的难度，其实不然，超静定结构就可以提供解决问题的途径：结构之所以能够被划分为超静定而非静定一类，在于其含有冗余的传力路径与否。如果破损只发生冗余的子结构部位，而剩下的部分尚有足够的力学性能，那么，整体结构是可以照常工作的。如此看来，工程师们在认为重要的部位，将其刻意加固成超静定子结构，这种经验值得借鉴。也就是说，结构尺度破损-安全的研究是具有可行性的。

换句话说，若设计得当，在某些构件或区域失效

亦即结构部分破损情况下,可以保障结构仍然具有足够的强度、刚度、稳定性或抗疲劳性等力学性能支承在役载荷。考虑破损-安全的结构而牺牲一定程度的经济性,增加了结构的适度冗余,从而有能力抵御结构的局部破损。严格讲,与其称为牺牲经济性,不如说付出值得花费的经济代价。

与此相反,结构轻量化设计通常会导致同结构破损-安全相反的倾向,例如连续体结构拓扑优化的类骨架结果,往往趋向于更少冗余的结构拓扑构型。尽管它是满足约束条件的最经济设计,但由于缺少冗余的子结构,从而对局部破坏过于敏感,进而在发生局部破损时,不能履行安全的使命。

其实,完全没有理由据此责备以往的结构拓扑优化,认为它缺乏安全保障。这样说,并非袒护以往的研究,原因在于:以往在设计之前没有考虑局部破损出现的状况。也就是说,以往设计潜在地依据着“常驻安全”的理念。

由此可见,结构破损-安全与结构轻量化的实施,分别使结构增加和减少冗余度。现在把二者放在一起,会怎么样呢? 会不会出现水火不容的现象? 其实,这种担心是完全没有必要的,正如把水放在锅里,就不出现水浇灭火的现象了。

“锅”是建模和求解技术,如果说结构破损-安全观念是“火”,那么,结构拓扑优化技术则是“水”。火烧开了水,可以譬如理性生成冗余区域的过程,生成的结果往往很像 Michell 框架(Michell 1904),实现了从超静定结构的感性设计经验到理性生成冗余区域的升华。可见,观念的叠加,产生了理论综合的结果。

现有研究表明:在结构拓扑优化技术中考虑破损-安全,可以在发生破损时,依然得到保证安全的最经济的拓扑构型。此方向的研究极具理论研究价值,可以丰富连续体结构拓扑优化理论,克服以往所得结构因缺少冗余而使局部破坏过于敏感的弱点,在航空、航天、交通运输、土建等行业领域具有广阔的应用前景。

上述不是刻意追求的结果,而是对深入思索、精心研究的回报。回眸一瞥,似乎会认为:缺乏破损-安全的考虑成为限制结构拓扑优化发展的原因,其实不然,正因为有了以往常驻安全的结构拓扑优化研究成果,如今才有了破损-安全的结构拓扑优化探索的可能。这表明:能否把连续体结构拓扑优化向前做大推进,取决于是否能够从根本进行思考,是否能够突破“想当然的”设计理念。

前面用“锅”“火”“水”譬如了建模和求解技术、结构破损-安全观念和结构拓扑优化三者的关系,其实,也可以把结构破损-安全观念替换为结构常驻安全的理念,其余两者不变。前后两个三者关系,出现了两种“火”,该做如何解读呢? 民谚说:“文火炖汤,武火炒菜”,因为“武火”比“文火”时间短,所以称结构破损-安全观念为“文火”,称结构常驻安全理念为“武火”。

7 观念本质——结构在役破损-安全的时间与空间剖析

人类对结构在役安全的期望,实际上处于变化之中。某个个体的结构,在人造世界中,也都具备时间和空间的要素,从时空进行思考,安全设计观念发生了从传统“安全”到破损-安全的飞跃,经历了 4 个理念的进化阶段。

从时间要素看,经历了从永驻安全到常驻安全的合理回归。从空间要素看,可以把结构划分为材料、构件和结构 3 个层次,如表 1 所示。

表 1 结构的两种安全观和安全理念的四个阶段

Tab. 1 Two safe concepts of structures and four stages of safe concept

理念阶段	时空观	安全的层次观			安全观念本质
		材料	构件	结构	
1	时间	永驻安全			传统安全观念
	空间	尽驻安全			
2	时间	常驻安全			传统安全观念
	空间	尽驻安全			
3	时间	部分破损	常驻安全		传统安全观念
	空间		尽驻安全		破损-安全观念
4	时间			常驻安全	破损-安全观念
	空间		部分破损	整体安全	

8 结论与展望

本研究梳理及归纳了结构安全观念的起源及发展,从材料、构件及结构 3 个层次,从空间及时间维度上对安全观念进行了深度梳理及剖析。对考虑结构破损-安全设计原则的结构优化、尤其对当前研究热点的结构拓扑优化的进展进行了综述,指出了相

关研究难点所在。

通过上述梳理及归纳,从结构破损-安全优化设计的角度,得到了工程设计上的两点启迪:遵循破损-安全设计原则并不意味着放弃安全-经济设计原则,相反,两个设计原则可以在结构优化模型中完美相融;利用结构破损-安全优化设计,可达到将超静定结构的感性设计经验上升到理性生成冗余区域的设计阶段。最终得到满足破损-安全约束的最经济结构拓扑构型。

在当今计算科学的软硬件条件飞速发展的背景下,通过结构优化技术实现上述两点融合的工程结构优化设计是完全可能的,但是仍存在不少困难需要克服。今后相当长的时间内,在考虑破损-安全设计原则的约束下、追求结构最经济的结构优化发展方面,离散杆系结构和连续体结构的拓扑优化依然会保持为热点研究方向。

目前国内外相关研究文献尚不多,该领域的研究还处于起步阶段。该方向研究要点将是:如何模拟结构局部破损状况? 如何减少结构的破损状况数以减少计算量? 如何进行局部破损下的快速重分析? 等等。有待学者们进一步深入探讨,从而克服系列研究难点。

参考文献:

[1] MILITARY STANDARD. Military structural integrity program, airplane requirements: MIL-STD-1530A (Notice 1)[S]. America: USAF,1975.

[2] WANHILL R J H, MOLENT L, BARTER S A. Milestone case histories in aircraft structural integrity[M]//Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Amsterdam: Elsevier, 2016:1-19.

[3] NIU M C Y. Airframe structural design[M]. 2nd ed. Hongkong: Hongkong Conmilit Press Ltd. ,1988.

[4] BAZANT Z P, ZHOU Y. Why did world trade center collapse? – simple analysis[J]. Archive of applied mechanics,2001,71(12): 802-806.

[5] SCHMIT L A. Structural design by systematic synthesis[C]//2nd Conference on Electronic Computation. Reston, VA, USA: ASCE, 1960:105-132.

[6] SUN P F, ARORA J S, HAUG E J. Fail-safe optimal design of structures[J]. Engineering optimization,1976,2(1):43-53.

[7] ARORA J S, HASKELL D F, GOVIL A K. Optimal design of large structures for damage tolerance[J]. AIAA journal,1980,18(5): 563-570.

[8] NGUYEN D T, ARORA J S. Fail-safe optimal design of complex structures with substructures[J]. Journal of mechanical design, 1982,104(4):861-868.

[9] FENG Y S, MOSES F. Optimum design, redundancy and reliability of structural systems[J]. Computers & structures,1986,24(2): 239-251.

[10] FENG Y S. The theory of structural redundancy and its effect on structural design[J]. Computers & structures,1988,28(1):15-24.

[11] MARHADI K, VENKATARAMAN S. Surrogate measures to optimize structures for robust and predictable progressive failure[J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2009, 39 (3): 245-261.

[12] MARHADI K S, VENKATARAMAN S, WONG S A. Load redistribution mechanism in damage tolerant and redundant truss structure [J]. Structural and multidisciplinary optimization,2011,44(2): 213-233.

[13] 杜剑明,郭旭. 基于鲁棒性优化的桁架结构失效-安全设计[J]. 力学学报,2011,43(4):725-730.
DU Jianming, GUO Xu. Fail-safe optimal design of truss structures based on robust optimization[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics,2011,43(4):725-730(in Chinese).

[14] MICHELL A G M. The limits of economy of material in frame-structures[J]. The london, edinburgh, and dublin philosophical magazine and journal of science,1904,8(47):589-597.

[15] SUI Y K, PENG X R. Modelling, solving and application for topology optimization of continuum structures: ICM method based on step function[M]. Kidlington: Butterworth-Heinemann,2018.

[16] BENDSØE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1988, 71 (2): 197-224.

[17] MLEJNEK H P. Some aspects of the genesis of structures[J]. Structural optimization,1992,5(1):64-69.

[18] 隋允康. 建模·变换·优化:结构综合方法新进展[M]. 大连:大连理工大学出版社,1996.

[19] XIE Y M, STEVEN G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization [J]. Computers & structures, 1993, 49 (5): 885-896.

[20] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations [J]. Journal of computational physics,1988,79(1):12-49.

[21] BOURDIN B, CHAMBOLLE A. Design-dependent loads in topology optimization[J]. ESAIM: Control, optimisation and calculus of variations,2003,9:19-48.

[22] NORATO J A, BENDSØE M P, HABER R B, et al. A topological derivative method for topology optimization[J]. Structural and multidisciplinary optimization,2007,33(4):375-386.

[23] GUO X, ZHANG W S, ZHONG W L. Doing topology optimization explicitly and geometrically— a new moving morphable components based framework [J]. Journal of applied mechanics, 2014, 81

(8):081009.

[24] JANSEN M,LOMBAERT G,SCHEVENELS M,et al. Topology optimization of fail-safe structures using a simplified local damage model[J]. Structural and multidisciplinary optimization,2014,49(4):657-666.

[25] ZHOU M,FLEURY R. Fail-safe topology optimization[J]. Structural and multidisciplinary optimization,2016,54(5):1225-1243.

[26] 彭细荣,隋允康. 考虑破损-安全的连续体结构拓扑优化ICM方法[J]. 力学学报,2018,50(3):611-621.
PENG Xirong,SUI Yunkang. ICM method for fail-safe topology optimization of continuum structures[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics,2018,50(3):611-621(in Chinese).

[27] 彭细荣,隋允康. 连续体结构破损-安全拓扑优化预估破损区域的理性准则[J]. 固体力学学报,2018,39(6):594-605.
PENG Xirong, SUI Yunkang. Rational criterion of pre-estimating failure region distribution for fail-safe topology optimization of continuum structures[J]. Chinese journal of solid mechanics,2018,39(6):594-605(in Chinese).

[28] 彭细荣,隋允康. 破损-安全拓扑优化的局部破损模式参数影响分析[J]. 计算力学学报,2019,36(3):317-323.
PENG Xirong,SUI Yunkang. Parameter effect analysis of local failure modes for fail-safe topology optimization[J]. Chinese journal of computational mechanics,2019,36(3):317-323(in Chinese).

[29] PENG X R,SUI Y K. Lightweight topology optimization with consideration of the fail-safe design principle for continuum structures[J]. Engineering optimization,2021,53(1):32-48.

[30] WANG H X,LIU J,WEN G L,et al. The robust fail-safe topological designs based on the von Mises stress[J]. Finite elements in analysis and design,2020,171:103376.

[31] AMBROZKIEWICZ O,KRIEGESMANN B. Adaptive strategies for fail-safe topology optimization[C]//2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization. Cham: Springer International Publishing,2019:200-211.

[32] AMBROZKIEWICZ O, KRIEGESMANN B. Density-based shape optimization for fail-safe design[J]. Journal of computational design and engineering,2020,7(5):615-629.

[33] KRANZ M, LÜDEKER J K, KRIEGESMANN B. An empirical study on stress-based fail-safe topology optimization and multiple load path design[J]. Structural and multidisciplinary optimization,2021,64(4):2113-2134.

[34] HEDERBERG H,THORE C J. Topology optimization for fail-safe designs using moving morphable components as a representation of damage[J]. Structural and multidisciplinary optimization,2021,64(4):2307-2321.

[35] SMITH H A,NORATO J A. Topology optimization of fail-safe structures via geometry projection[C]//AIAA Scitech 2021 Forum. Reston,VA,USA:AIAA,2021:AIAA 2021-2026.

[36] MARTÍNEZ-FRUTOS J, ORTIGOSA R. Risk-averse approach for topology optimization of fail-safe structures using the level-set method[J]. Computational mechanics,2021,68(5):1039-1061.

[37] MARTÍNEZ-FRUTOS J,ORTIGOSA R. Robust topology optimization of continuum structures under uncertain partial collapses[J]. Computers & structures,2021,257:106677.

[38] 胡诗绮. 二维桁架的失效-安全拓扑优化算法[D]. 武汉:华中科技大学,2015.

[39] STOLPE M. Fail-safe truss topology optimization[J]. Structural and multidisciplinary optimization,2019,60(4):1605-1618.

[40] LÜDEKER J K,KRIEGESMANN B. Fail-safe optimization of beam structures[J]. Journal of computational design and engineering,2019,6(3):260-268.

[41] KASPAR J,VIELHABER M. Sustainable lightweight design-relevance and impact on the product development & lifecycle process[J]. Procedia manufacturing,2017,8:409-416.

[42] ZHU J H,ZHANG W H,XIA L. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design[J]. Archives of computational methods in engineering,2016,23(4):595-622.

(编辑 张璐)